

## АНАЛІЗ ВИДІЛЕННЯ ТЕПЛА Й РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВАННЯ ПРИ РОЗДАЧІ ВАЛІВ ТЕРТЯМ

Кандидат технічних наук Голяк О.Л.,  
кандидат технічних наук Зяхор І.В.,  
Сопоцько Ю.О.,  
Дементєєв О. В.

*Виконано розрахунок тепловиділення при роздачі валів тертям з використанням методу, який ґрунтується на вирішенні зворотної задачі теплопровідності. На основі даних розрахунку температури нагріву визначено осьове зусилля роздачі валу заданих розмірів із сталі 40Х інструментом із сплаву ВК6. Отримані дані можуть бути використані при розрахунку енергосилових параметрів устаткування для відновлення деталей інших типорозмірів.*

*There has been accomplished a calculation of liberation of heat in the process of distribution of shafts by friction. There has been used a method, that is based on solving of a reverse task of thermal conduction. On the basis of the data, obtained from calculation of heating temperature, there has been determined a thrust force of distribution of reference dimension shaft, made of 40 Chrome steel, with an instrument, made of Tungsten/Cobalt 6 alloy. The obtained data may be used for calculation of energy and force parameters of equipment intended for restoration of parts of different range of sizes*

**Постановка задачі.** Процес нагрівання при зварюванні тертям і інших технологічних процесах, що використовують тертя (формування, наплавлення, роздача отворів), активно досліджується як експериментально, так і теоретично [1-7]. При роздачі валів тертям максимальна температура та її розподіл значно впливають на структуру металу відновлюваного вала, а також на зусилля, необхідне для виконання його роздачі. Для розрахунку розподілу температури нагрівання при роздачі валу тертям необхідно, насамперед, визначити швидкість виділення тепла на границі розділу інструмент-вал.

**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** Існують чотири методи розрахунку виділення тепла при терті. Два з них засновані на коефіцієнті тертя, третій — на експериментальному визначенні розсіювання потужності, і четвертий — на зворотній моделі теплопровідності для оцінки виділення тепла [1, 4-6]. У зворотній моделі переносу тепла [6] використовуються результати експериментів по вимірюванню температури вала в процесі його роздачі термомпарами, закріпленими на різній відстані від поверхні контакту.

**Мета статті.** Виконати розрахунок тепловиділення при роздачі валів тертям з використанням методу, який ґрунтується на вирішенні зворотної задачі теплопровідності, розрахунковим шляхом визначити температуру нагріву вала у зоні контакту з інструментом та на основі отриманих даних визначити осьове зусилля роздачі.

**Викладення основного матеріалу.** Для визначення виділення тепла на поверхні тертя (границі розділу вал-інструмент) виконаємо побудову зворотної моделі теплопровідності. Експериментальні дані по визначенню температури нагрівання вала в процесі роздачі, одержані за допомогою розташованих у зоні нагрівання термомпар, використаємо для розрахунку теплового потоку на поверхні тертя.

Оскільки градієнт температур у твердому тілі визначається за експериментальними вимірами, тому тепловий потік можна розрахувати як добуток коефіцієнта теплопровідності твердого тіла на градієнт температур на поверхні. У зворотному завданні теплопровідності використаємо метод кінцевих різниць для оцінки теплового потоку  $q(t)$  на границі розділу при терті, за умови, що відомі значення перехідної температури на поверхні вала.

Зміну температури в процесі роздачі вимірювали за допомогою трьох термомпар, закріплених на поверхні вала відповідно на відстані 5; 15 і 25 мм від торця вала. При роздачі валів тертям виділення тепла на границі розділу відбувається приблизно рівномірно, цикл роздачі досить короткий, і втрати тепла на випромінювання й конвекцію незначні. Тому можна припустити, що бічні поверхні вала перебувають в адіабатичному граничному стані, і що розподіл температури по площині, паралельній поверхні тертя, є

рівномірним. Таким чином, температура в цій площині, апроксимується одним значенням у точці перетинання при одномірному 1-D аналізі методом кінцевих різниць.

На основі методу кінцевих різниць перехідне диференціальне рівняння, що описує нестационарну 1-D теплопровідність із застосуванням змінних теплових властивостей і з урахуванням поступального руху інструмента, можна записати в такий спосіб:

$$T_{i,j-1} = T_{i,j} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\alpha_{i+1,j} + \alpha_{i,j} + \alpha_{i-1,j}}{3} \times (T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + u \frac{\Delta t}{\Delta x} (T_{i-1,j} - T_{i,j}) \quad (1)$$

Граничні вузли на поверхні нагрівання ( $x = 0$ ) з індексом  $i = 1$  можна виразити наступним чином:

$$T_{1,j-1} = T_{1,j} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\alpha_{1,j} + \alpha_{2,j} + \alpha_{3,j} + \alpha_{4,j} + \alpha_{5,j}}{5} \times \frac{(-25T_{1,j} + 48T_{2,j} - 36T_{3,j} + 16T_{4,j} - 3T_{5,j})}{12} + \frac{q_j}{\rho C_p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2)$$

Для граничних вузлів при  $x = L$  (кінцева точка руху інструмента при роздачі)

$$T_{I,j+1} = T_{I,j} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (\alpha_{I,j} + \alpha_{I-1,j}) \cdot (T_{I-1,j} - T_{I,j}) + u \frac{\Delta t}{\Delta x} (T_{I,j} - T_{I-1,j}) \quad (3)$$

Для граничних вузлів при  $x = L$

$$T_{I,j-1} = T_{I,j} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (\alpha_{I,j} + \alpha_{I-1,j}) \cdot (T_{I-1,j} - T_{I,j}) + u \frac{\Delta t}{\Delta x} (T_{I,j} - T_{I-1,j}) \quad (6)$$

де  $I$  — число збільшень відстані  $x$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots$ ;

$J$  — число збільшень часу  $\Delta t$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots$ ;

$\alpha$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) — коефіцієнт температуропровідності матеріалу вала;

$q_j$  ( $\text{Вт м}^{-2}$ ) — тепловий потік, викликаний тертям.

$\rho$  ( $\text{кг/м}^3$ ) — питома вага матеріалу

$C_p$  ( $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) — питома теплоємність

$u$  ( $\text{м/с}$ ) — швидкість переміщення інструмента

При цьому  $q_j$  — векторна форма  $q(t)$  у формулюванні завдання. Величини збільшень вибираються таким чином, щоб дотримувався критерій стабільності для явного чисельного рішення:

$$\frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (4)$$

Єдиним невідомим у зазначеній моделі кінцевих різниць є тепловий потік  $q_j$ , викликаний тертям. Рішення зворотного завдання теплопровідності застосовується для визначення  $q_j$ . Зворотне завдання вирішують за допомогою мінімізації цільової функції  $R$ , що є нормою найменших квадратів, і визначається відповідно до формули

$$R = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (Y_{ij} - T_{ij})^2 \quad (5)$$

де  $Y_{ij}$  і  $T_{ij}$  — вектори, що містять вимірювані й розрахункові температури, і верхні індекси  $i$  і  $j$  позначають збільшення відстані й часу, відповідно.

Припустимо, що матриця температурних вимірів  $Y_{ij}$  задається для положень  $x_i$  й часу  $t_j$ , і існує розумне вихідне припущення  $q_{0j}$  для невідомого вектора  $q_j$ . Температури  $T_{ij}$  необхідно розрахувати на основі прямого формулювання кінцевих різниць і порівняти із вимірними значеннями  $Y_{ij}$ . Якщо цільова функція  $R$ , що представляє собою середньоквадратичне відхилення між  $Y_{ij}$  і  $T_{ij}$ , менше, ніж задане припустиме відхилення від граничної величини, приймаються наявні величини  $q_j$ . В іншому випадку можна й далі мінімізувати цільову функцію шляхом розрахунку градієнта помилок, виконання кроку корекції по  $q_j$  і повторення зазначених кроків. І, нарешті, визначити відповідний тепловий потік, викликаний тертям.

Щоб використовувати вищевказаний метод, необхідно описати зміну  $q(t)$ . Для апроксимації  $q(t)$  використовується лінійна інтерполяція:

$$q(t) = q_j + (q_{j-1} - q_j) \cdot \frac{t - t_j}{\Delta t} \quad \text{for } t_j < t < t_{j-1} \quad (6)$$

де  $t_j = j \Delta t$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ .

Експериментально визначені термічні цикли та швидкість осьового переміщення дорна в перші 15 с процесу роздачі наведено на рис. 1. Визначена температура на найближчій відстані від торця вала ( $x = 5$  мм) використовується для зворотної моделі теплопровідності.

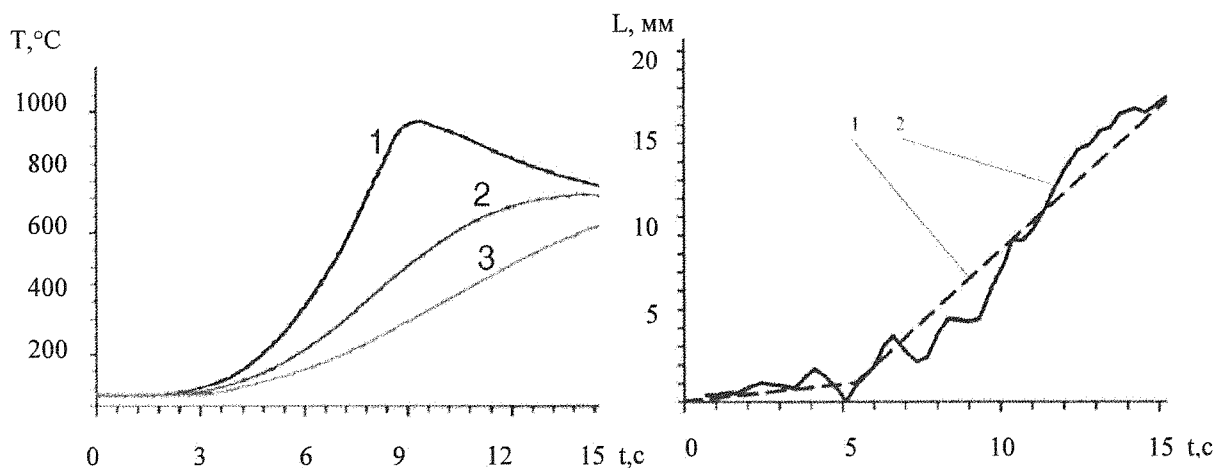


Рис. 1. Зміна температури поверхні вала (а) на відстані  $x$  від торця вала:  $x=5$  (1); 15 (2), 25 мм (3); осьове переміщення інструмента в процесі роздачі (б): 1- розрахункове, 2- експериментальне

На рис. 2 показано розрахункову зміну температури нагріву вала на внутрішньому діаметрі вала в зоні початкового контакту з дорном і на зовнішній поверхні вала.

Температура нагріву вала у зоні роздачі досягає максимального значення 1080°C на поверхні контакту вал-інструмент приблизно за 4 с після початку процесу роздачі. Аналіз даних, представлених на рис. 1, б і рис. 2, показує, що осьове переміщення інструменту, тобто процес роздачі вала, починається після досягнення максимальної температури у зоні контакту з інструментом і перевищення на зовнішній поверхні вала нижнього значення температурного інтервалу гарячої деформації сталі 40X (800...1250°C) [7]. Оскільки температура нагріву вала у зоні роздачі перевищує температуру поліморфного перетворення сталі 40X ( $A_{c3}=830^\circ\text{C}$ ), то метал вала після роздачі буде мати структуру нормалізації.

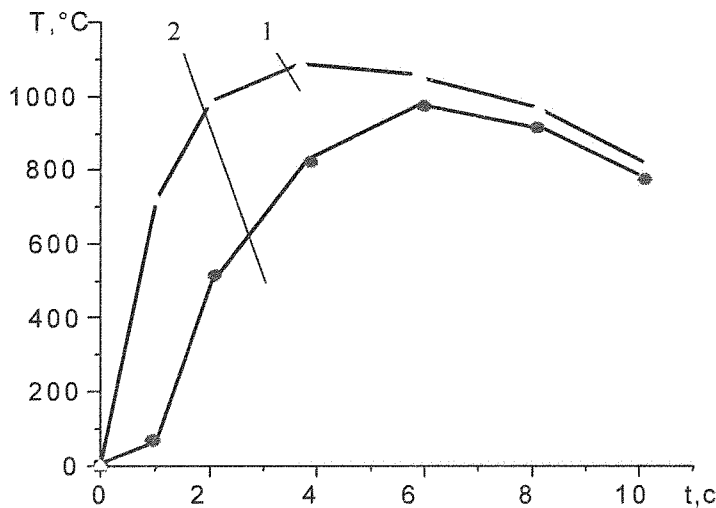


Рис. 2. Розрахункова зміна температури нагріву вала, отримана з використанням зворотного методу: 1 — на внутрішньому діаметрі вала в зоні початкового контакту з дорном, 2 — на зовнішньому діаметрі вала

Використаємо дані розрахунку температури для визначення енергосилових параметрів роздачі. Для визначення загального осьового зусилля  $P$  роздачі вала зі сталі 40X використовуємо формулу:

$$P=0,25 \cdot \pi \cdot \beta \cdot \sigma_{\tau}(D-d_0) [\ln D_0/d_0(1+\sin \alpha + \sin \alpha)] \cdot (1+\mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \quad (7)$$

де  $\beta$  — коефіцієнт Лодє ( $\beta=2/3^{0,5}=1,15$ )

$\sigma_{\tau}$  — межа текучості сталі 40X при заданій температурі роздачі;

$D, d$  — діаметр відповідно дорна й внутрішнього отвору вала до роздачі.

$\alpha$  — кут роздачі.  $\mu$  — коефіцієнт тертя (для частоти обертання  $n=33 \text{ c}^{-1}$   $\mu=0,2$  [8]).

Після підстановки у формулу (7) конкретних значень, визначимо розрахункове зусилля, необхідне роздачі вала зі сталі 40X:  $P=824 \text{ кг} = 8075 \text{ Н}$ .

## Висновки

1. Виконано розрахунок тепловиділення при роздачі валів тертям з використанням методу, який ґрунтується на вирішенні зворотної задачі теплопровідності. У даному методі експериментальні дані, одержані за допомогою розташованих на зовнішній поверхні вала термопар, використано для розрахунку температури нагріву вала у зоні контакту з інструментом.

2. Температура нагріву вала у зоні роздачі досягає максимального значення 1080°C на поверхні контакту вал-інструмент приблизно за 4 с після початку роздачі.

3. Осьове переміщення інструменту, тобто процес роздачі вала, починається після досягнення максимальної температури у зоні контакту з інструментом і після досягнення на зовнішній поверхні вала нижнього значення температурного інтервалу гарячої деформації сталі 40X.

4. Метал вала після роздачі буде мати структуру нормалізації, оскільки температура нагріву вала у зоні роздачі перевищує температуру поліморфного перетворення сталі 40X.

5. На основі даних розрахунку температури нагріву визначено осьове зусилля роздачі валу заданих розмірів із сталі 40X інструментом із сплаву ВК6. Отримані дані можуть бути використані при розрахунку енерго-силових параметрів устаткування для відновлення деталей інших типорозмірів.

### Література

1. Лебедев В.К., Миргород Ю.А., Вакуленко С.А. Математическое моделирование тепловых процессов и вязкого течения металла при сварке трением // Автомат. сварка. -1987.-№1.-С.3-6.
2. Лебедев В.К., Черненко И.А. Распределение мощности в стыке при сварке трением // Автомат. сварка. — 1984. — №12. — С. 23-25.
3. Норицын И.А., Газизов Б.Я. Крутящий момент при осадке стержня вращающимся инструментом с локальным нагревом за счет трения // Кузнечно-штамповое производство. — 1976. — №8. — С. 34-36.
4. Лебедев А.Р. Исаев А.Н. Компьютерное моделирование осесимметричного локального нагружения цилиндрических заготовок при дорновании отверстий // Кузнечно-штамповое производство. — 2001. — №5. — С. 37-39.
5. Fu L., Duan L. The coupled deformation and heat flow analysis by finite element method during friction welding // Weld. Res. Suppl. 1998. — №5. — P. 202s-207s.
6. Özisik MN, Orlande HRB. Inverse heat transfer: fundamentals and applications. New York: Taylor & Francis; 2000.
7. Марочник сталей и сплавов/В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. Ред. В.Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
8. Енергетичні параметри процесу відновлення деталей автомобілів роздачею з локальним нагріванням за рахунок сил тертя / Голяк О.Л., Зяxor І. В., Сопочко Ю.О., Дементєєв О. В. — Управління проектами, системний аналіз і логістика. — 2010. — №7. — С. 51-56.

УДК 621.793:621.919

## МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ БЕЗВОДНЕВИМ АЗОТУВАННЯМ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ, ІНТЕНСИФІКОВАНИМ ХОЛОДНИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Доктор технічних наук *Посвятенко Е.К.*,  
кандидат технічних наук *Рутковський А.В.*,  
*Алексєєв В.В.*

*Досліджено вплив холодного пластичного деформування на інтенсивність безводневого азотування у тліючому розряді. Показано, що поєднання цих процесів дозволяє збільшити товщину азотованого шару на 50-90%.*

*The influence of cold plastic deformation on the intensity of non-hydrogen nitridation in glow discharge is researched. It is shown that the combination of these processes can increase the thickness of the nitridated layer by 50-90%*

**Актуальність і стан проблеми, теоретичні передумови і постановка завдання дослідження.** Безводне іонно-імпульсне азотування у пульсуючій плазмі тліючого розряду (БАТР) є одним з найбільш ефективних процесів, що застосовуються при виготовленні, відновленні та підвищенні зносостійкості відповідальних деталей дорожніх транспортних засобів, зокрема колінчастих валів ДВЗ та компресорів. Заміна водню, як класичного робочого середовища, на аргонно-азотну суміш у процесах БАТР дозволила позбутися так званого водневого окрихчення і, як наслідок, погіршення механічних властивостей серцевини деталей. Висока якість поверхневого шару та основи у цих процесах досягається за рахунок їх виконання при температурах, нижчих від температур високого відпускання, що виключає короблення деталей, а також за рахунок високої енергії потоку частинок, що конденсуються на поверхні. Завдяки цьому у мікрооб'ємах поверхневого шару створюються умови, які забезпечують утворення нітридів, а також зміцнення фериту або аустеніту сталі за рахунок розчинення азоту в останніх. Відомо, що для реалізації БАТР використовується метастабільна (додатна) ділянка вольт-амперної характеристики, так звана область сильно поточного тліючого розряду [1]. У цій області завдяки іонізації газу стають стру-